



# Auswirkungen des globalen Luftverkehrs auf die Klimaentwicklung – eine Einschätzung

Robert Sausen

DLR-Institut für Physik der Atmosphäre

Oberpfaffenhofen

Wettbewerbsfähigkeit und Umweltstandards im Luftverkehr

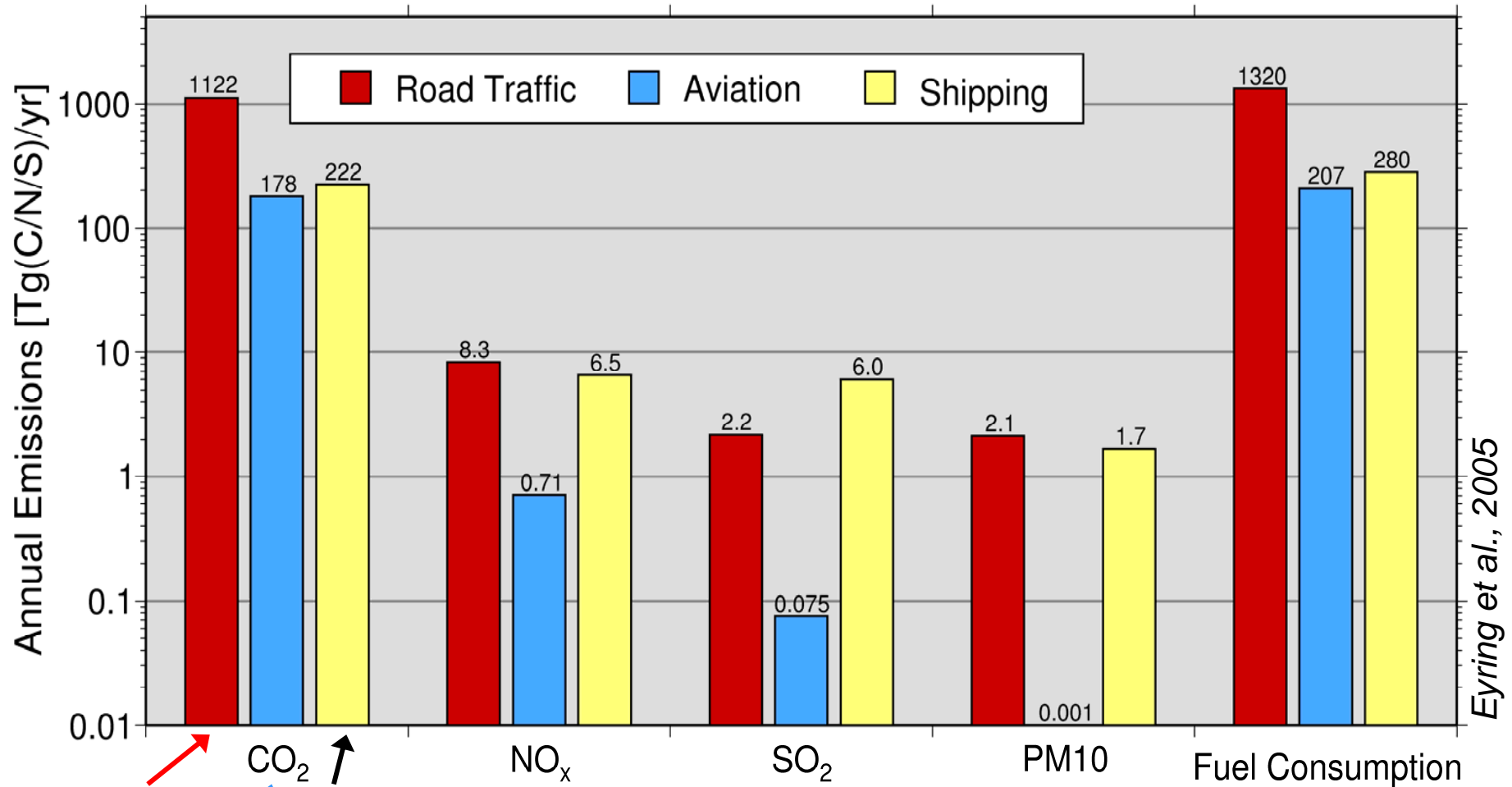
– Zum Sachstand nationaler und europäischer Planungen

Berliner Forum Zukunft, DGAP, Berlin , 15. März 2007

# Auswirkungen des Luftverkehrs auf das Klima

- Emission von Treibhausgasen ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , ... )
- Emission von Ozonvorläufern ( $\text{NO}_x$ , ... )
- Emission von Partikeln und deren Vorläufer
- Triggern von zusätzlichen Wolken (Kondensstreifen, Contrail-Cirrus) und Modifikation vorhandener Wolken

# Emissions from different modes of transport in 2000

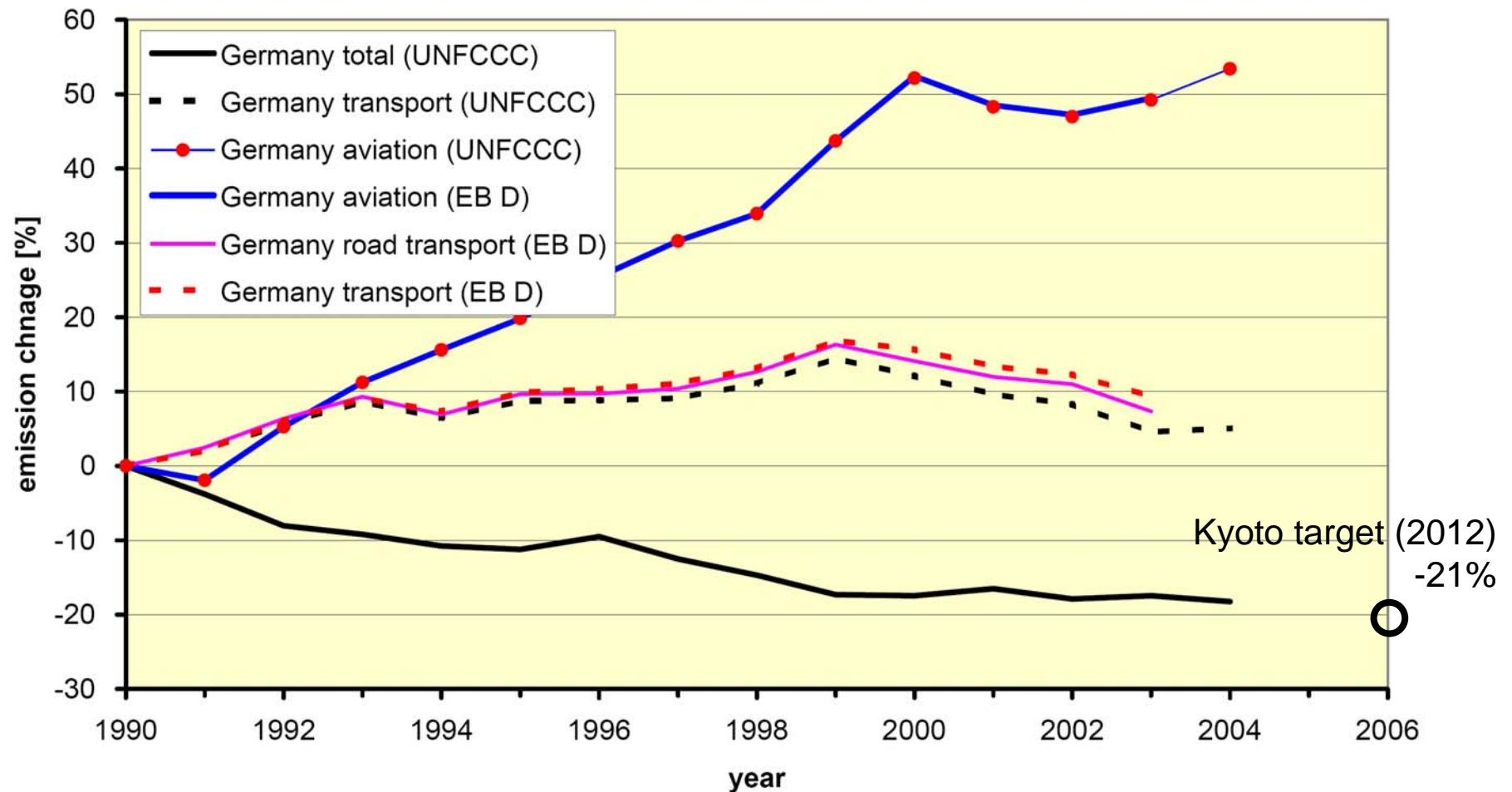


13.8 %  
2.2 %  
2.7 %

Contribution of transport to the total anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions

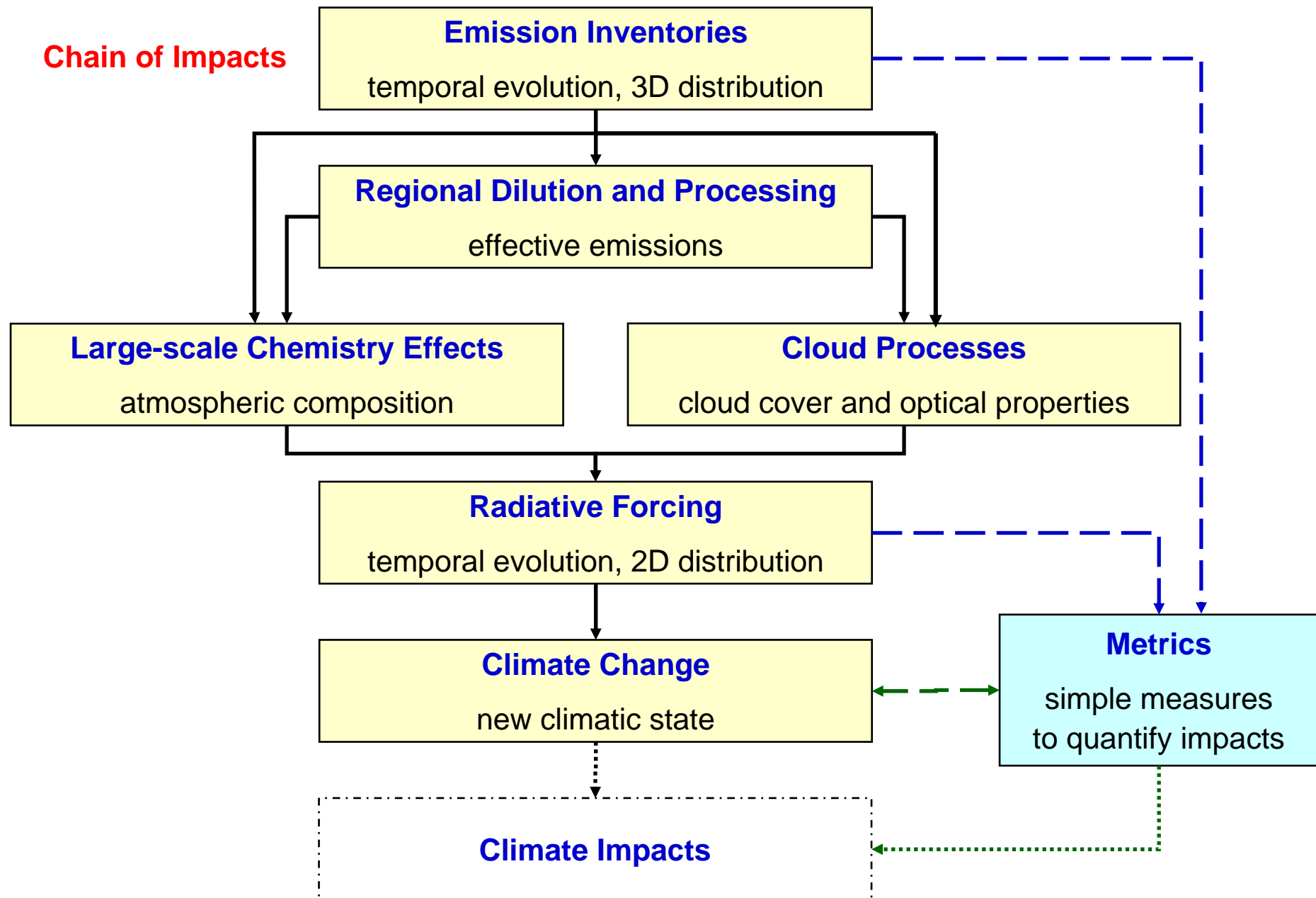
**Sausen's car:** 20000 km/yr, 1500 l (Diesel)/yr:  
6 \* 10<sup>-9</sup> of the aviation CO<sub>2</sub> emissions

## Change of German equivalent CO<sub>2</sub> emissions relative to 1990

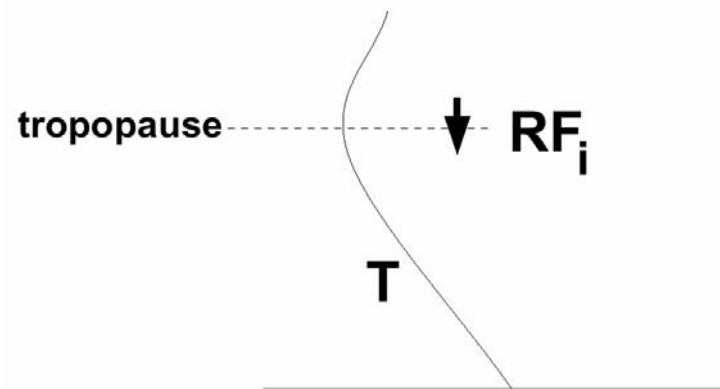


data: <http://unfccc.int>  
<http://www.ag-energiebilanzen.de/>

## Chain of Impacts



# Radiative forcing (RF)

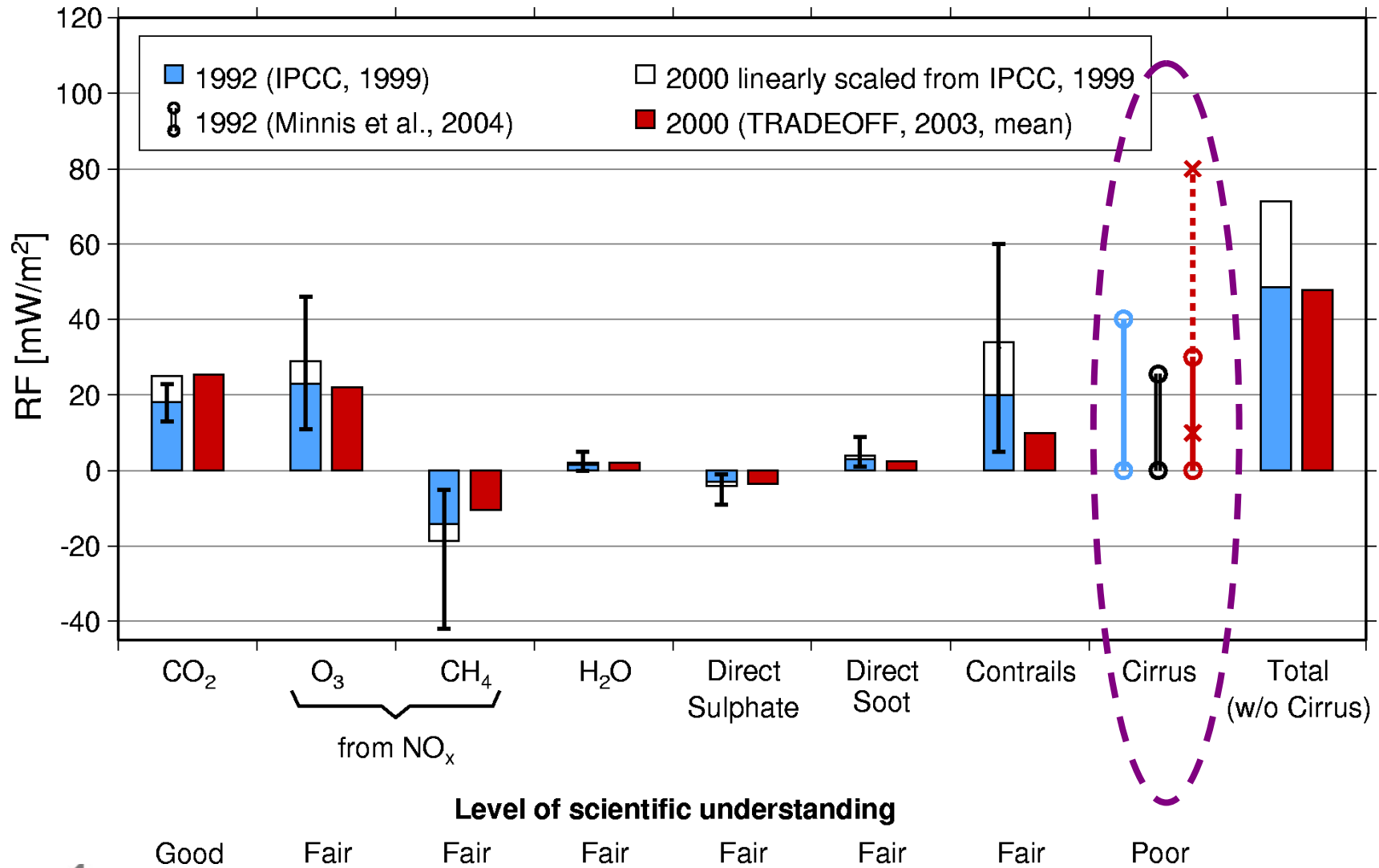


instantaneous tropopause RF

*Stuber et al., 2001;  
based on Hansen et al., 1997*

# Updated Aviation Radiative Forcing for 2000

## Aircraft RF



Sausen et al., 2005

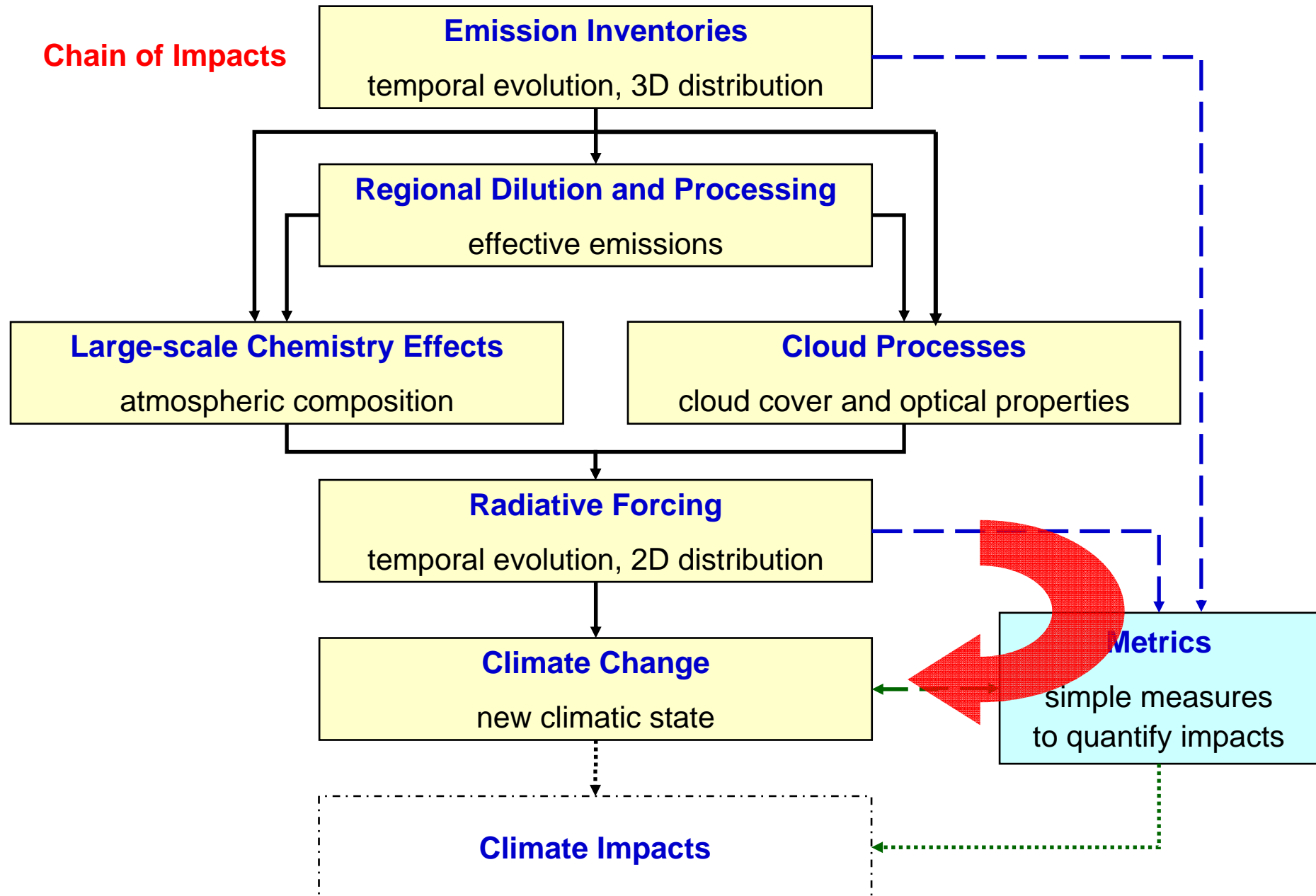


Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt e.V.  
in der Helmholtz-Gemeinschaft

DGAP 2007

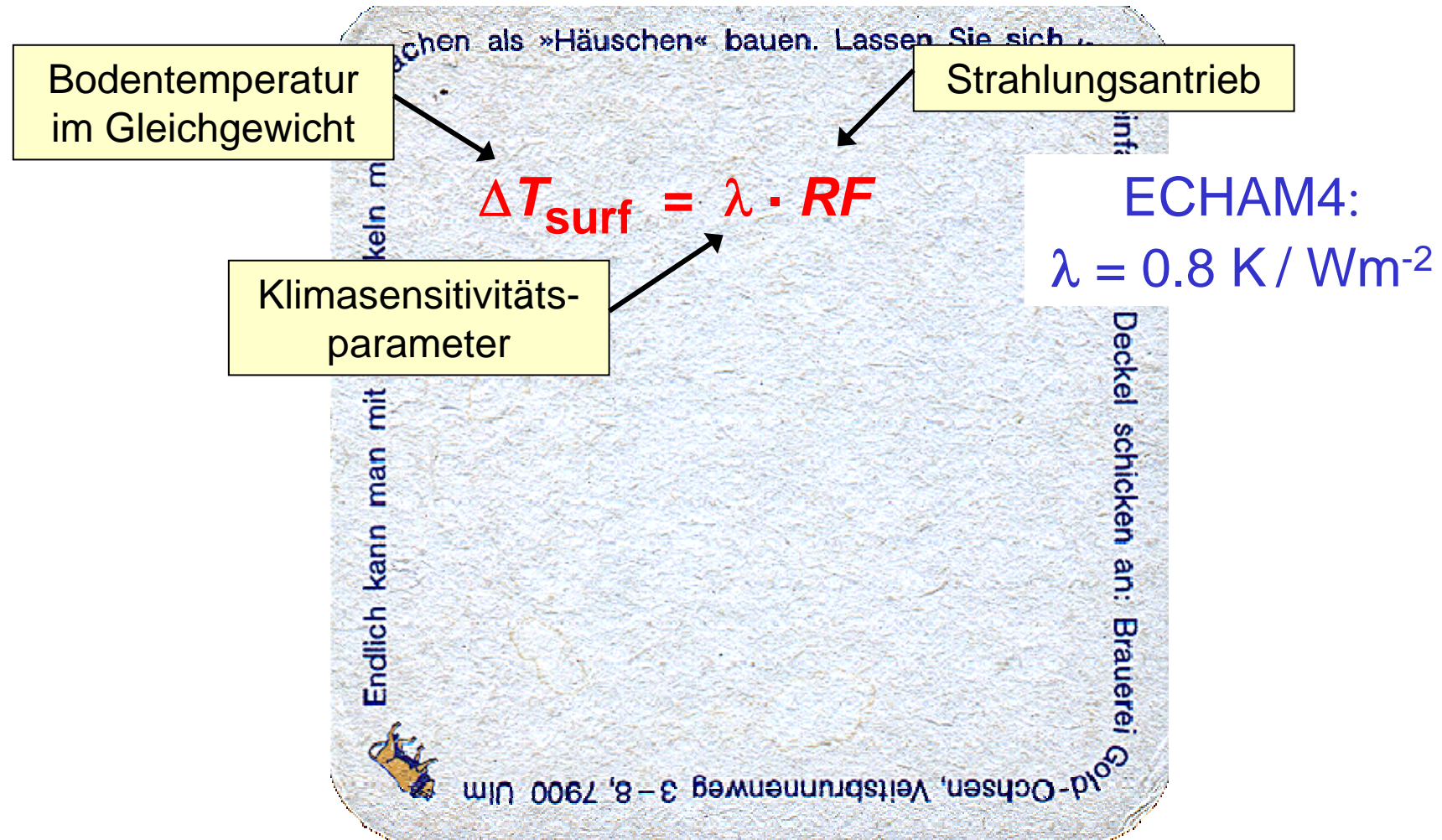
15.03.2007

## Chain of Impacts

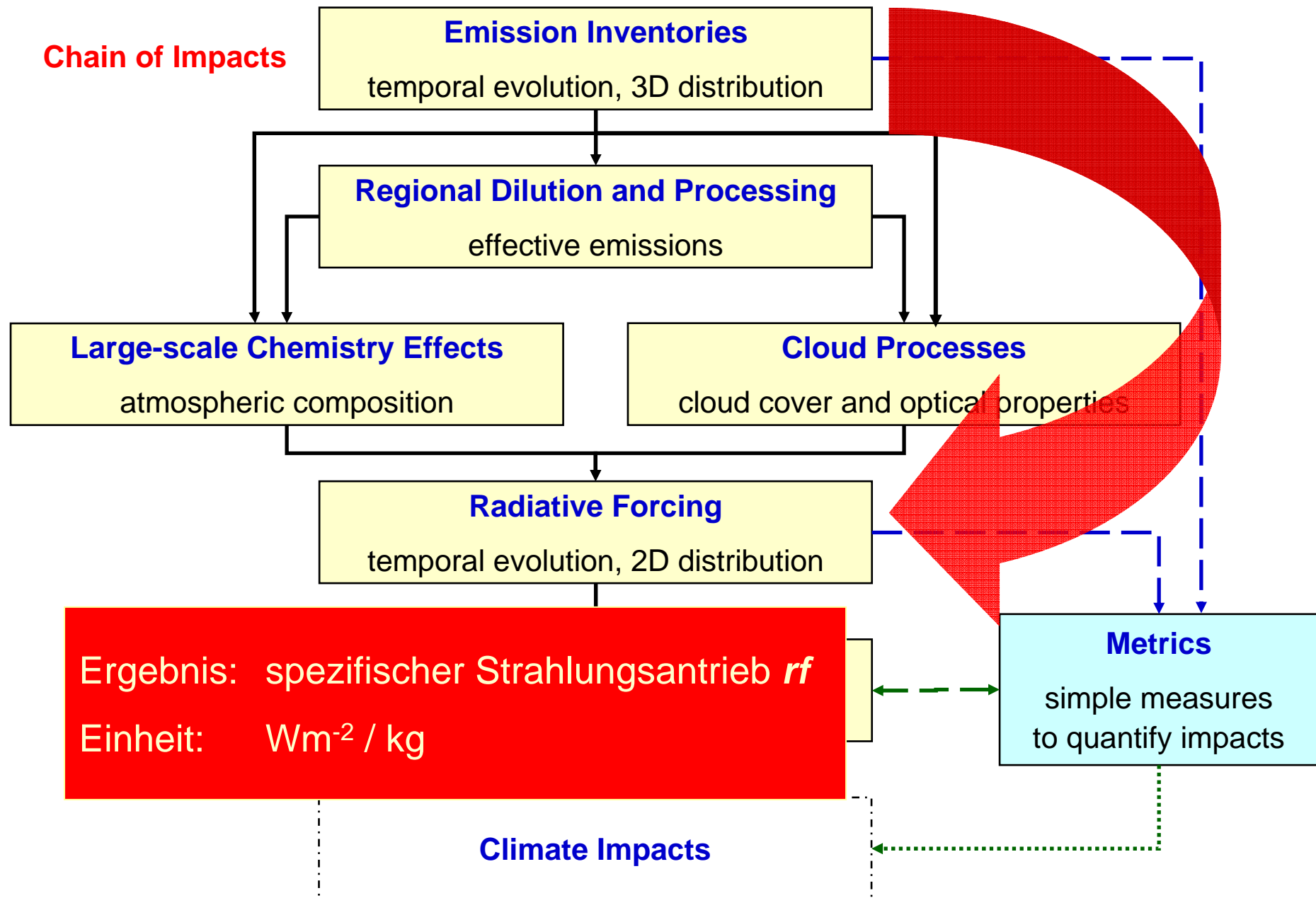




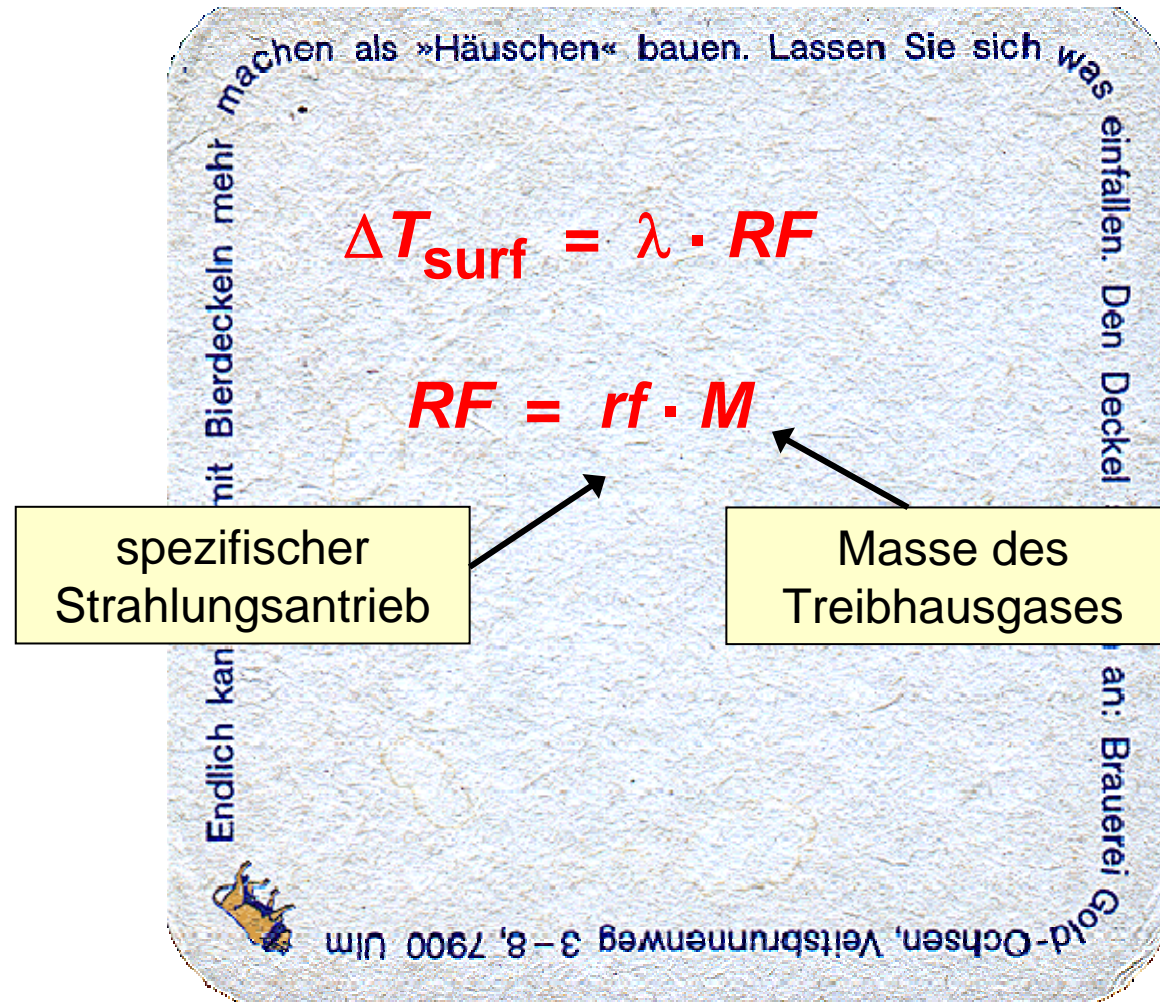
# Radiative Forcing $RF$ and Surface Temperature Change $\Delta T_s$



## Chain of Impacts

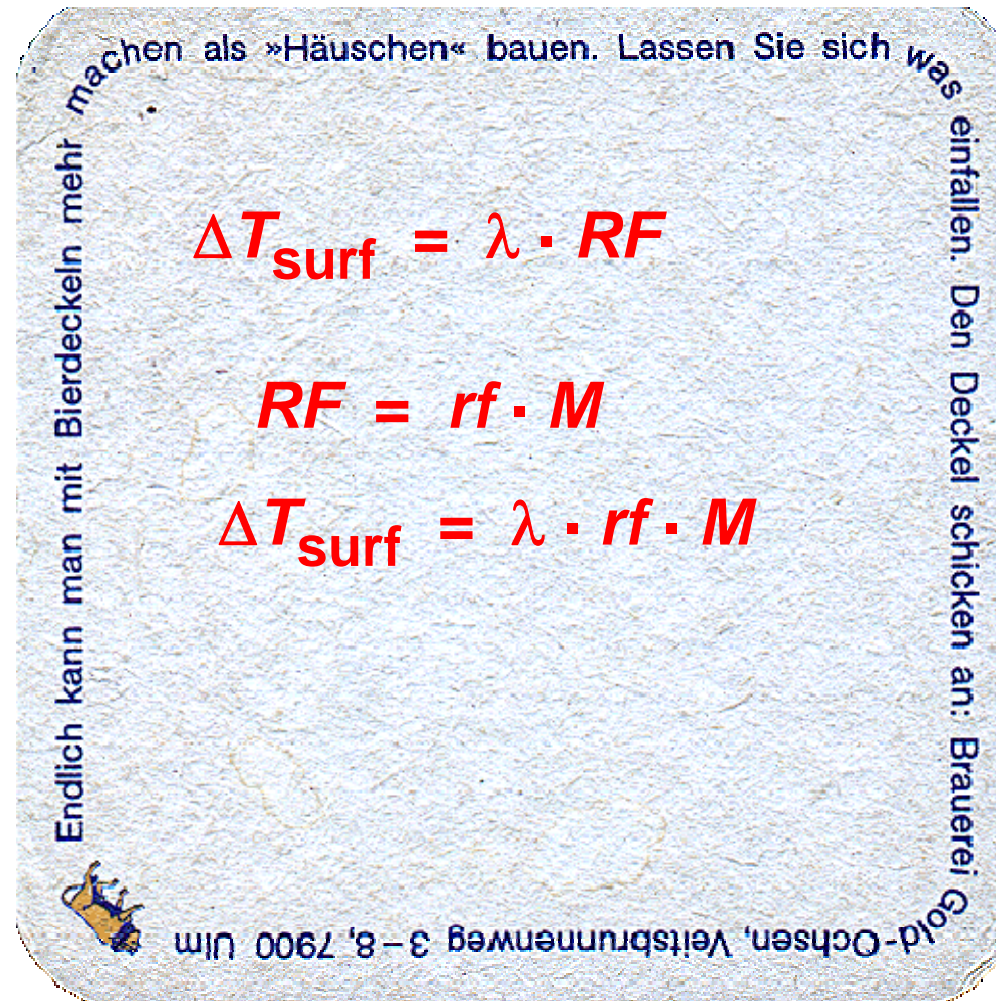


# Radiative Forcing $RF$ and Surface Temperature Change $\Delta T_s$





# Radiative Forcing $RF$ and Surface Temperature Change $\Delta T_s$

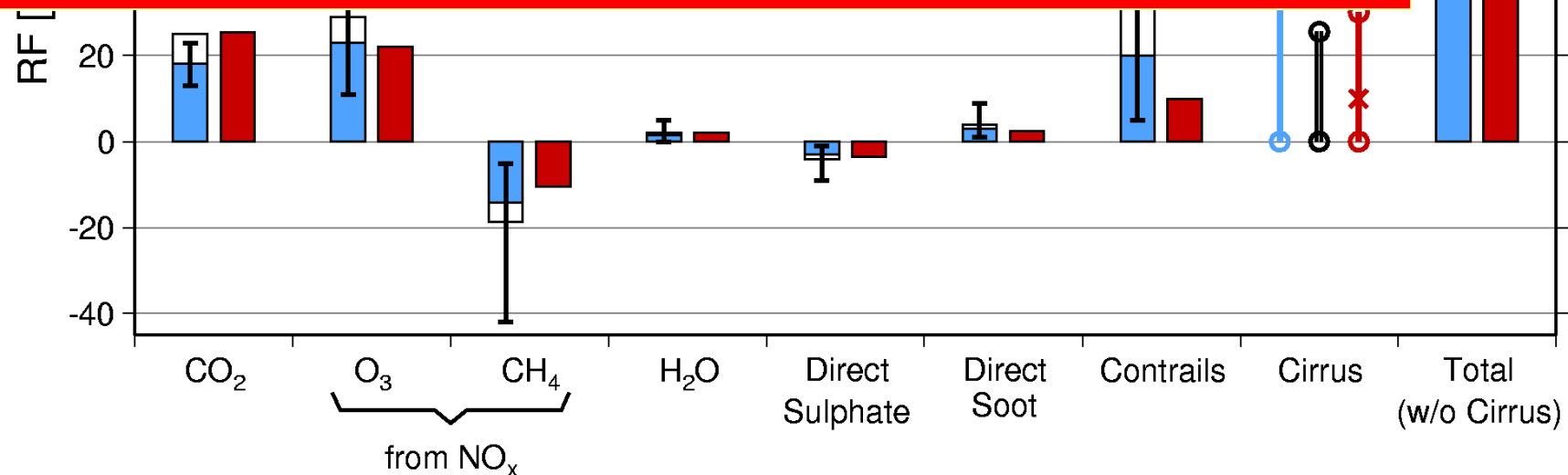


# Updated Aviation Radiative Forcing for 2000

## Aircraft RF

**Fragen:** Ist der Strahlungsantrieb RF die richtige Größe, um die zukünftigen einzelnen Beiträge des Luftverkehrs zu vergleichen?

Kann ich auf diese Weise die Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte beim Emissionshandel berücksichtigen? (Stichwort RFI)



Sausen et al., 2005

### Level of scientific understanding

Good

Fair

Fair

Fair

Fair

Fair

Fair

Poor

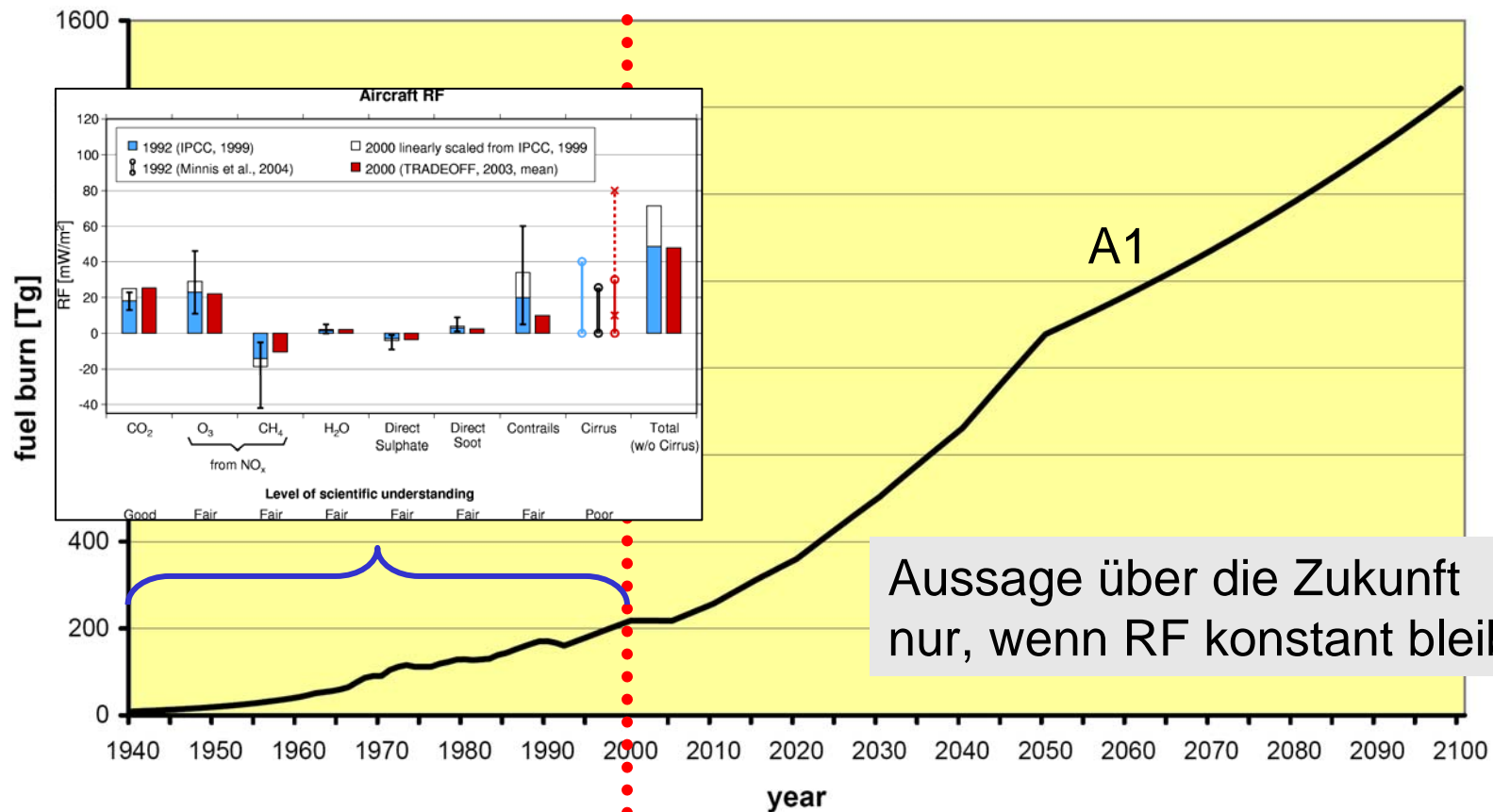


Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt e.V.  
in der Helmholtz-Gemeinschaft

DGAP 2007

15.03.2007

# Emissionen und Strahlungsantrieb



$RF(t=2000)$ : Ergebnis aller Emissionen der Vergangenheit

# Was muss ich wissen, um die Klimawirkung des Luftverkehrs zu bewerten ?

- Was hat der Luftverkehr zum Klimawandel bisher beigetragen?

- Verständnis des Klimasystems

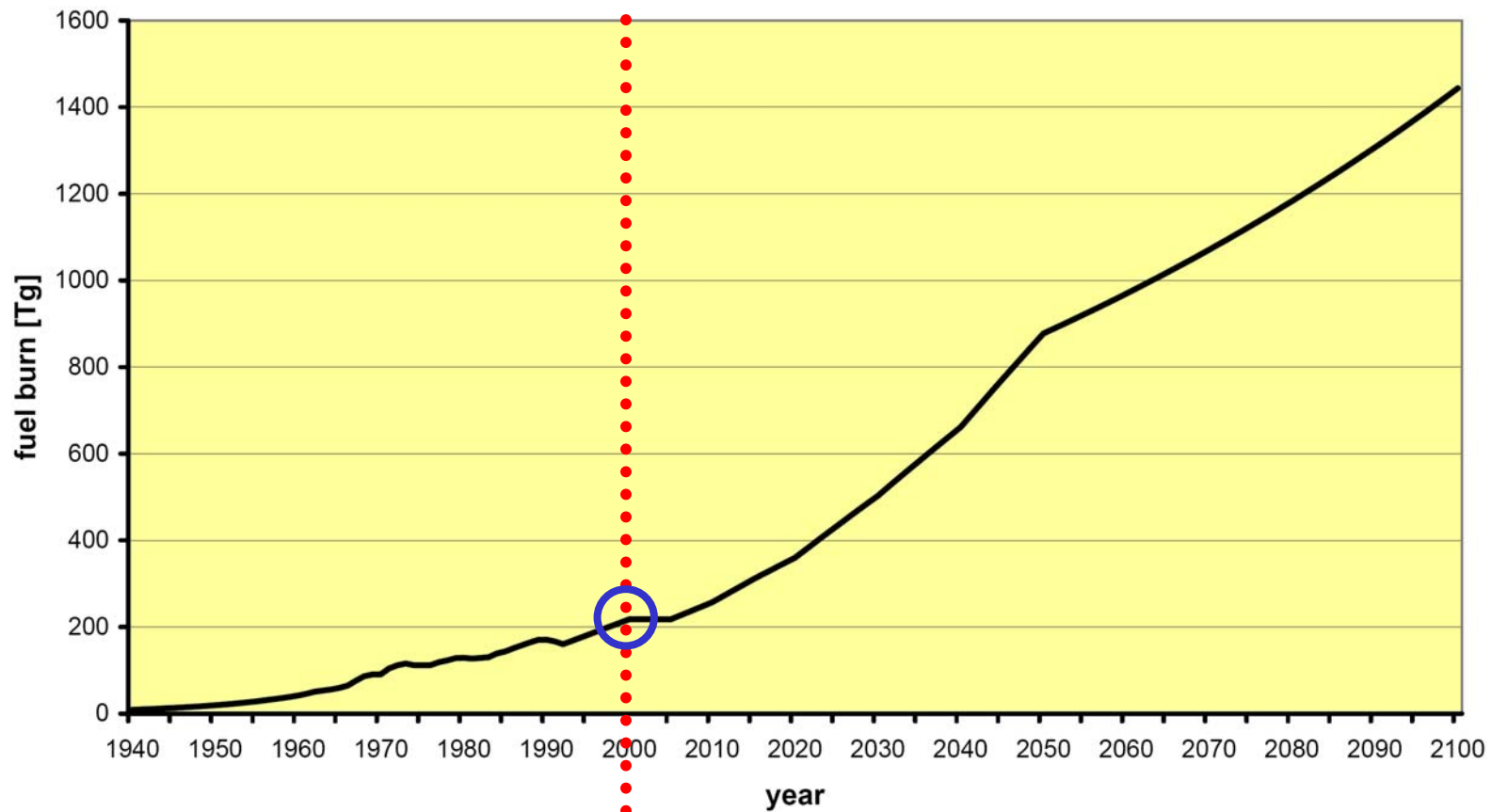
- Welchen Beitrag liefert der Luftverkehr des Jahres 2000 (oder eines beliebigen anderen Jahres) zur Klimaänderung?

- Hilfsmittel für die Emissions-Steuerung

- Welche Gesamtwirkung haben Maßnahmen

- Szenariensimulationen

# Emissionen und Strahlungsantrieb



marginaler Strahlungsantrieb  $\Delta RF(t=2000)$ :

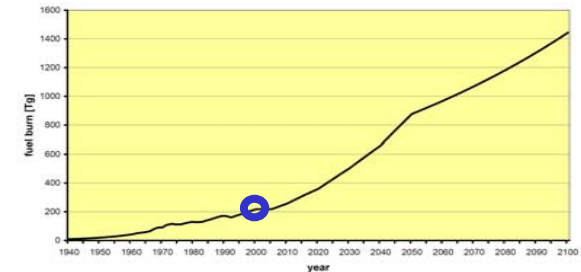
Strahlungsantrieb aufgrund der Emissionen im Jahr 2000



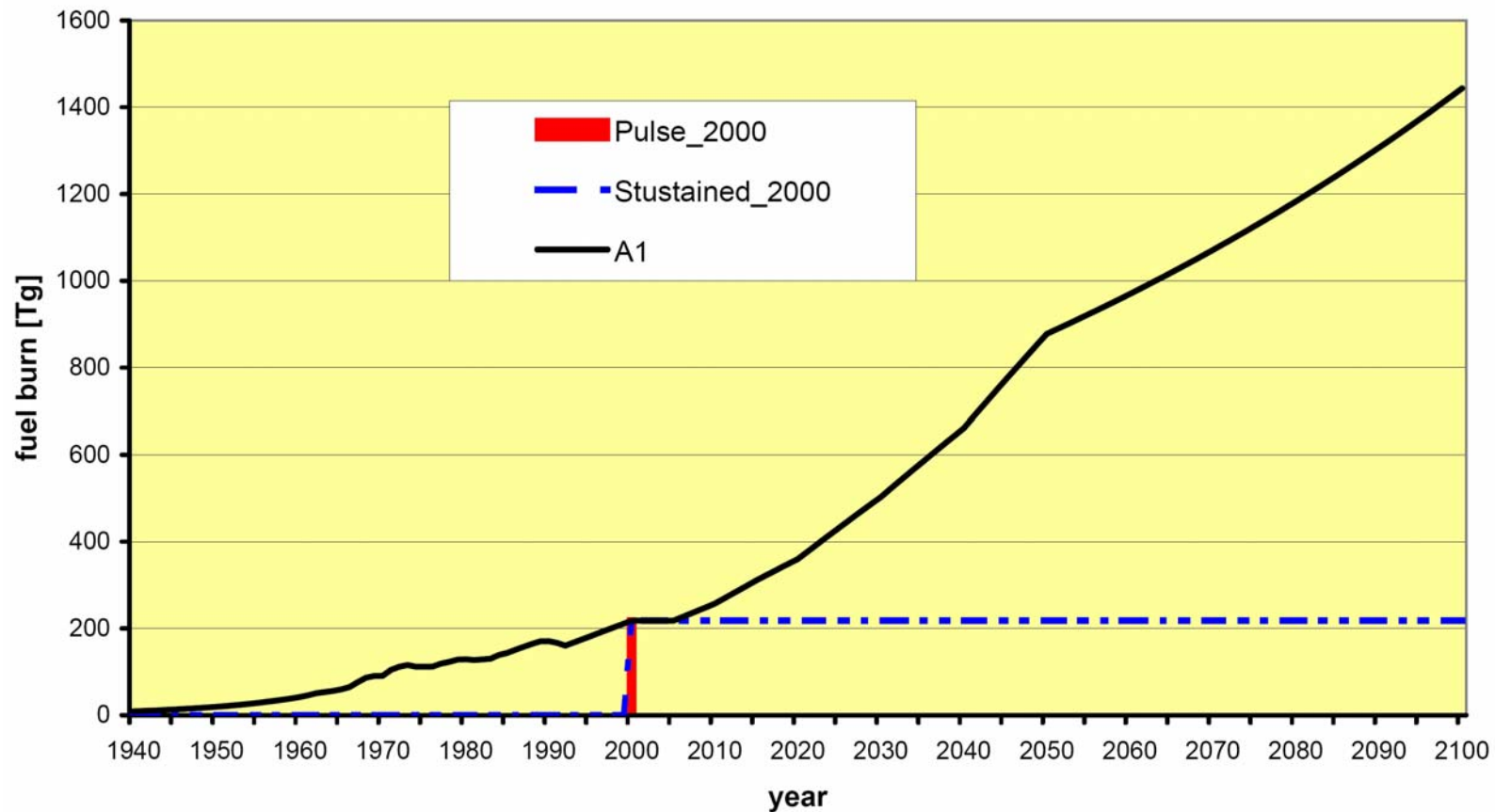


# Maßzahlen zur Bewertung der Klimawirkung

- Strahlungsantrieb  $RF(t=2000)$
- marginaler Strahlungsantrieb  $\Delta RF(t)$   
"pulse" and "sustained"



# Pulse and sustained emissions



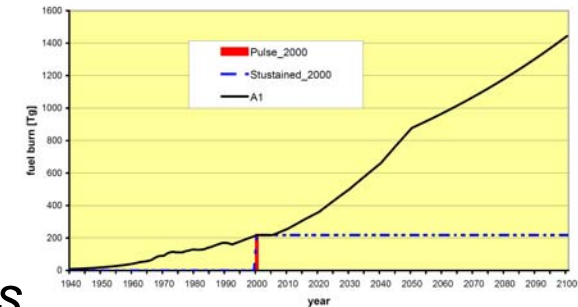
Pulse\_2000: Aviation emissions only in 2000

Sustained\_2000: Aviation emission of year 2000 constant until 2100



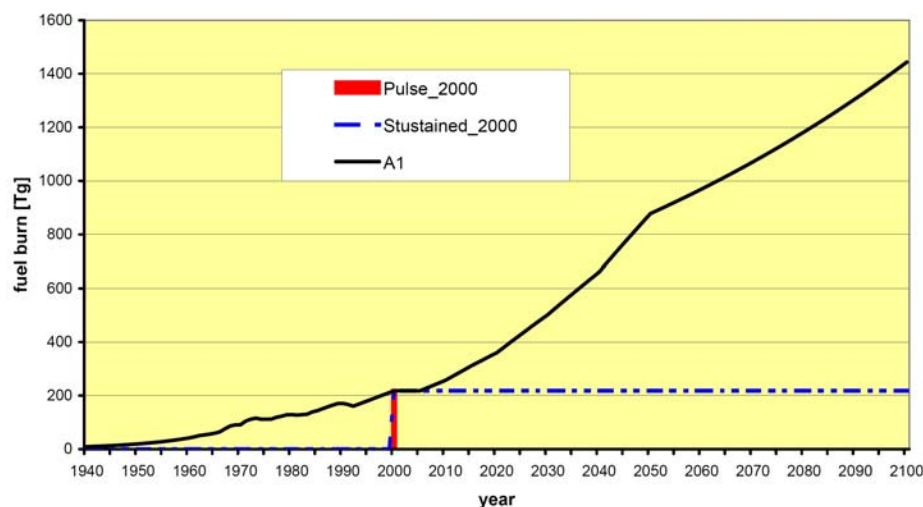
# Maßzahlen zur Bewertung der Klimawirkung

- Strahlungsantrieb  $RF(t=2000)$
- marginaler Strahlungsantrieb  $\Delta RF(t)$   
"pulse" and "sustained"
- integrierter (marginaler) Strahlungsantrieb  $\int_{2000}^t \Delta RF(s) ds$   
"pulse" and "sustained"
- Temperaturänderung  $\Delta T(t)$   
"pulse" and "sustained"

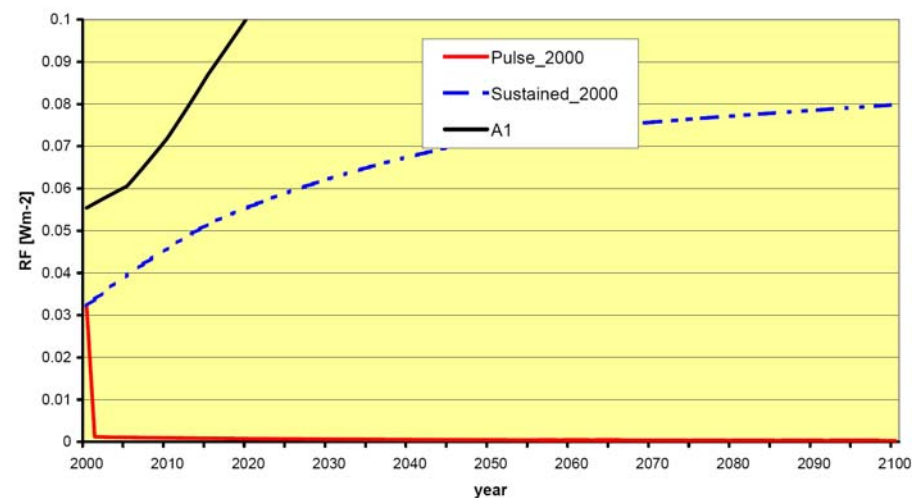


# Pulse and sustained emissions: CO<sub>2</sub> concentration, $\Delta RF$ and $\Delta T$

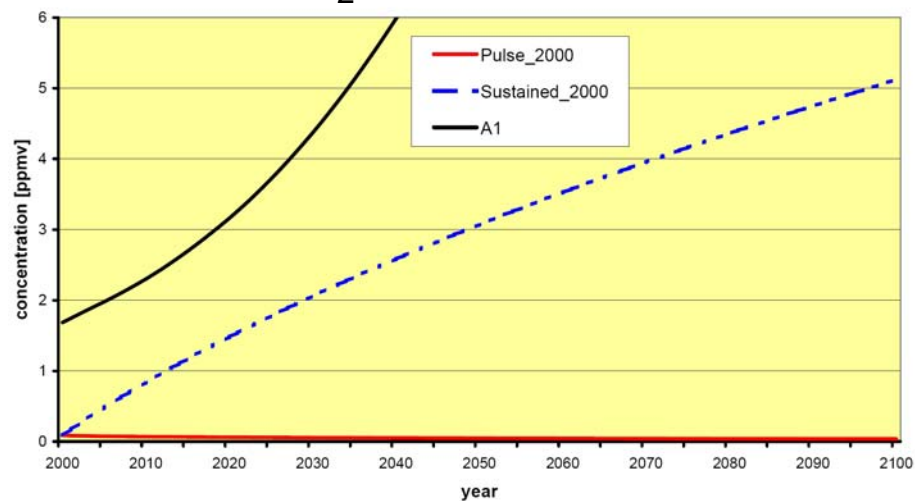
## Emissions



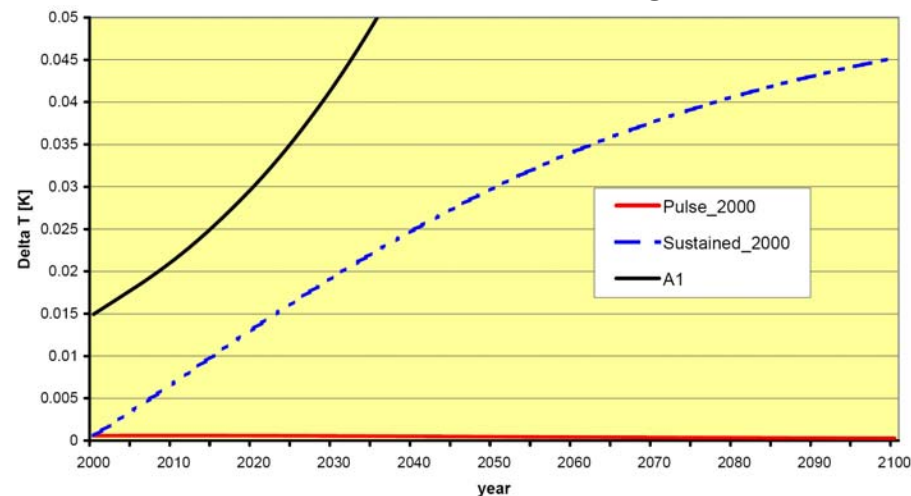
## Radiative forcing



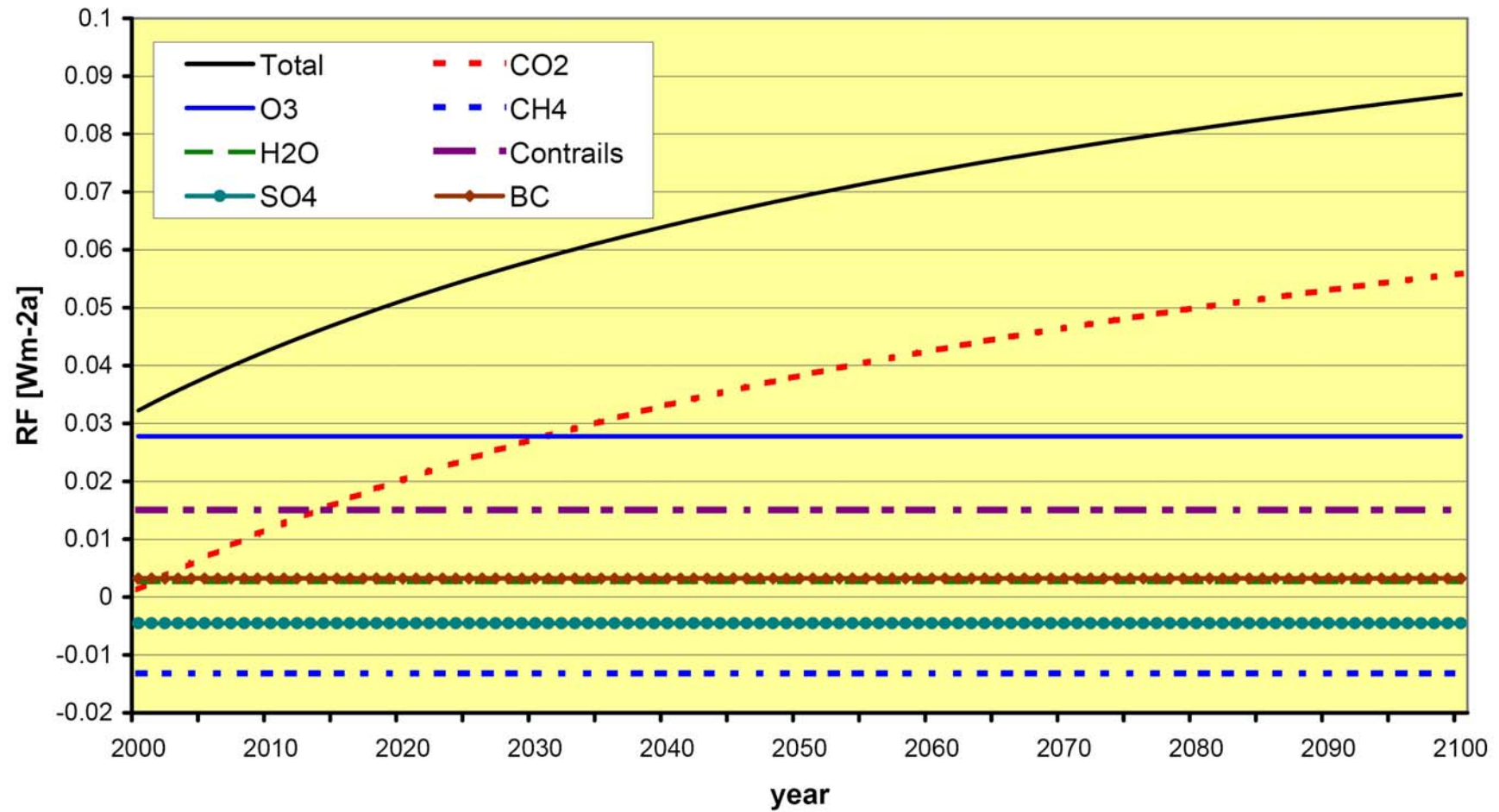
## CO<sub>2</sub> concentration



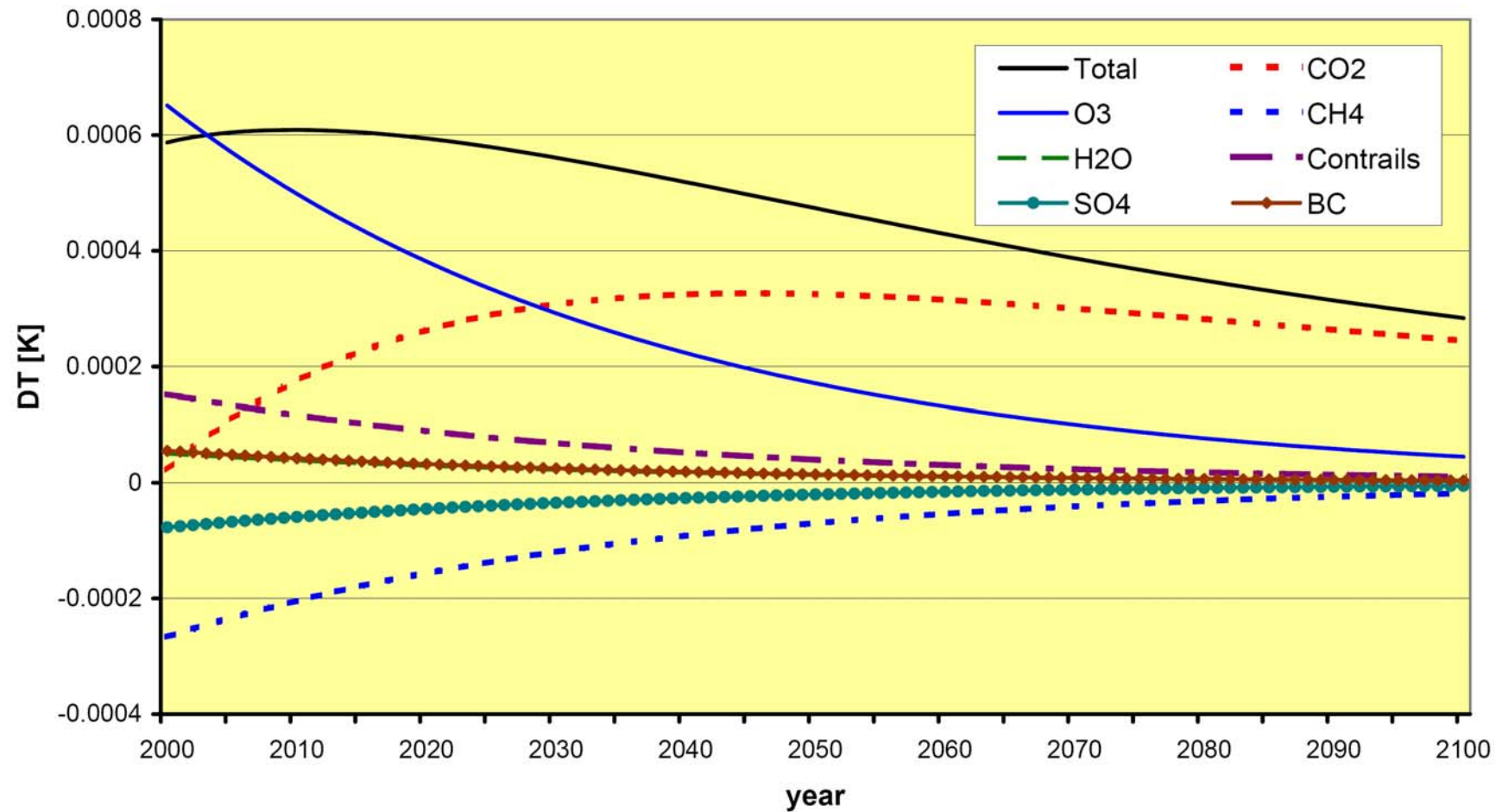
## Temperature change



## Pulse\_2000: Integrated radiative forcing

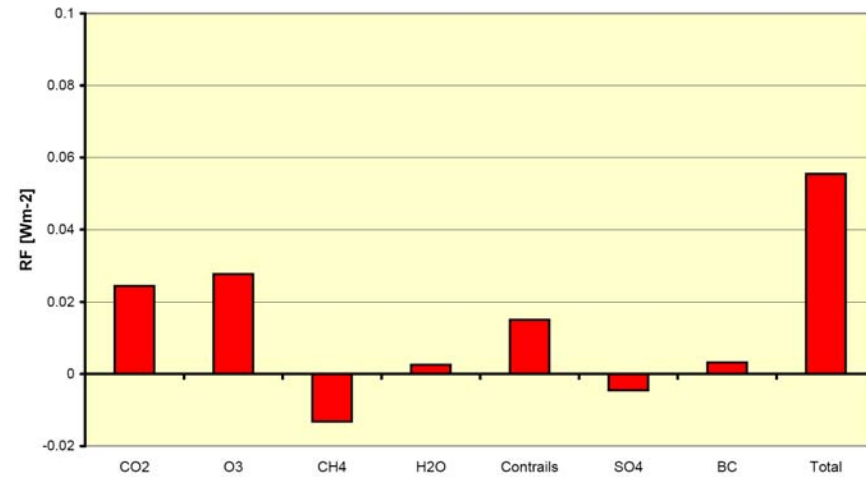


## Pulse\_2000: Temperature change

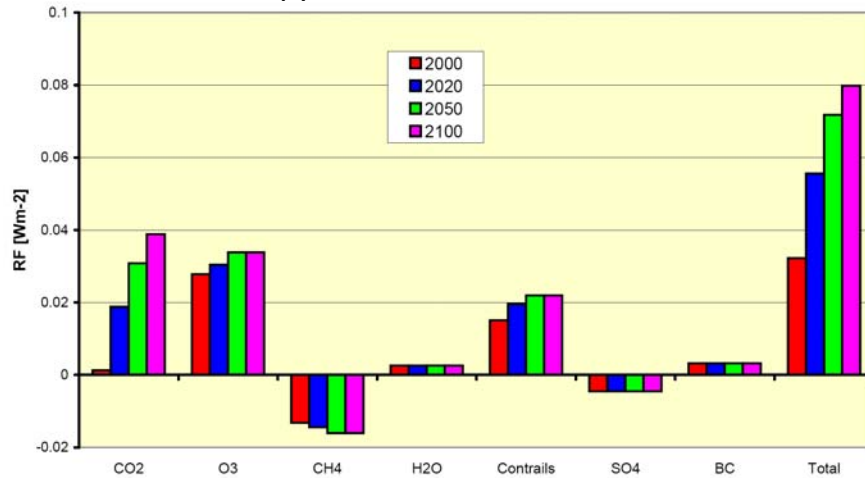


# Radiative Forcing für 2000, 2020, 2050, 2100

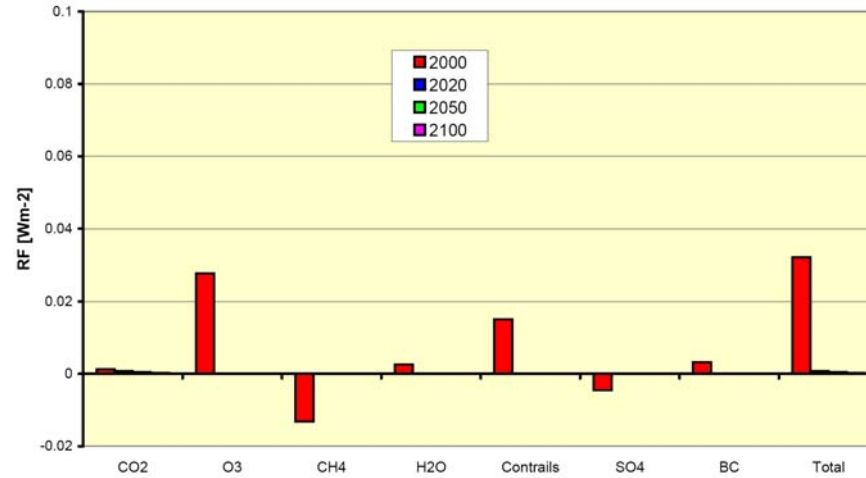
$RF(t=2000)$  A1



$RF(t)$  Sustained\_2000



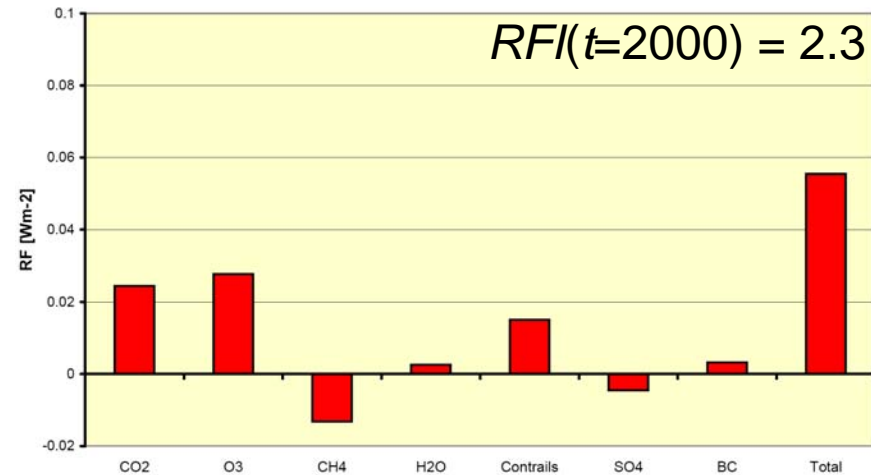
$RF(t)$  Pulse\_2000



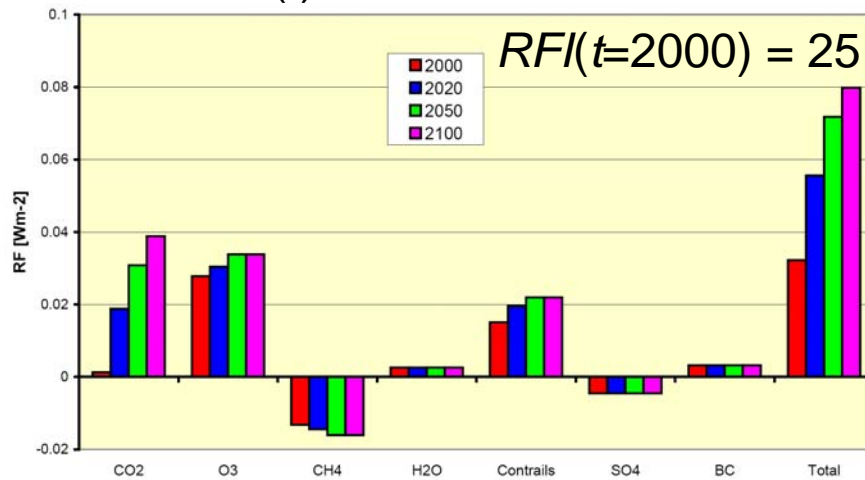
# RFI (Radiative Forcing Index)

$$RFI = \frac{RF_{total}}{RF_{CO2}}$$

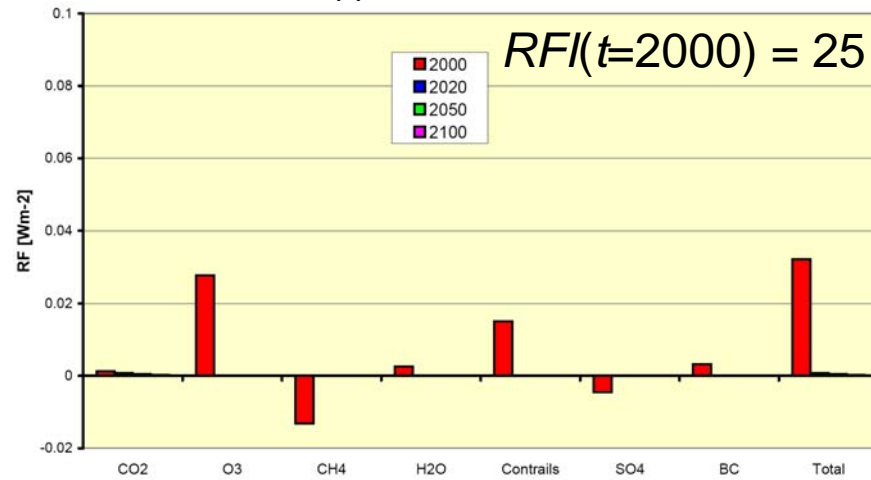
*RF(t=2000) A1*



*RF(t) Sustained\_2000*

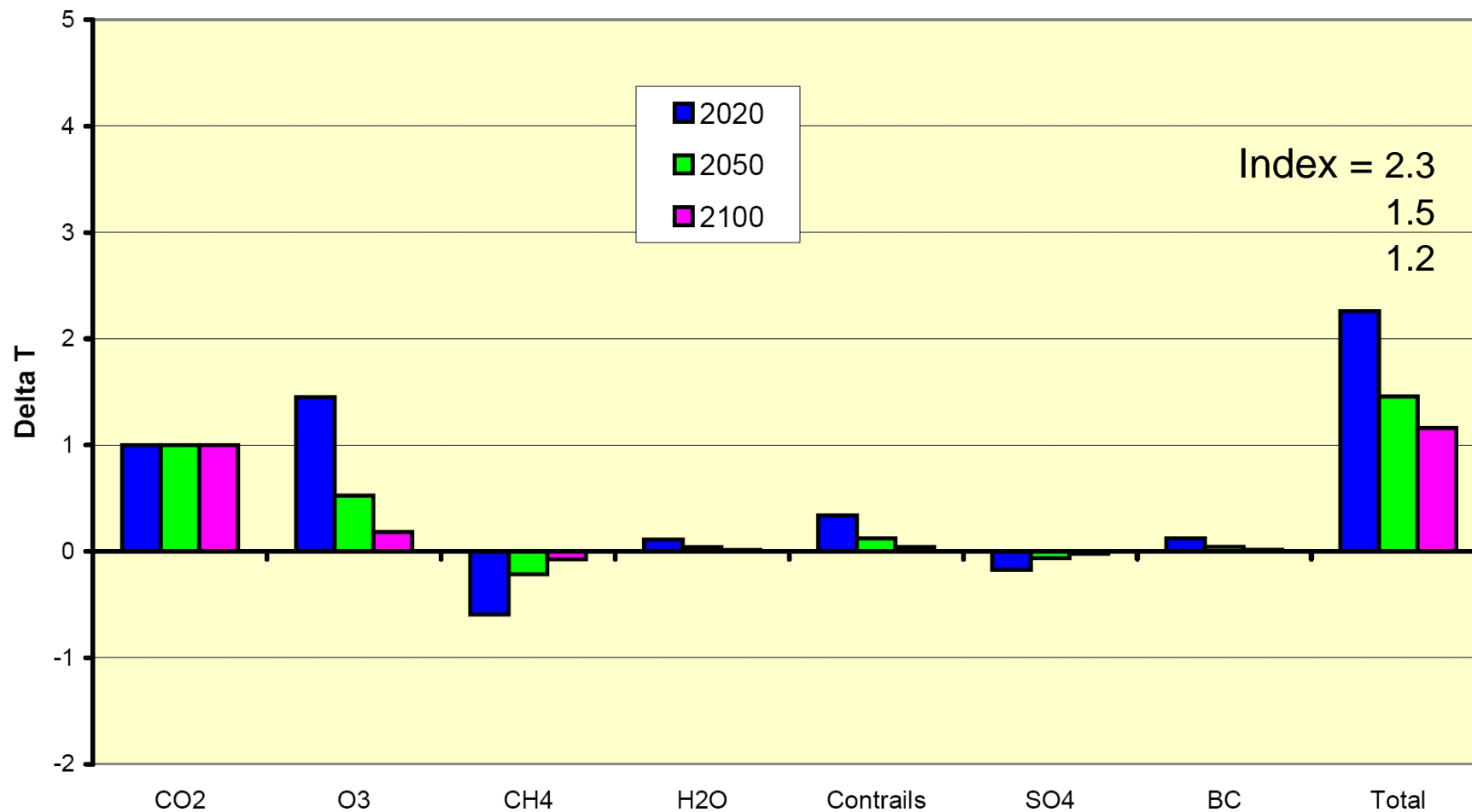


*RF(t) Pulse\_2000*



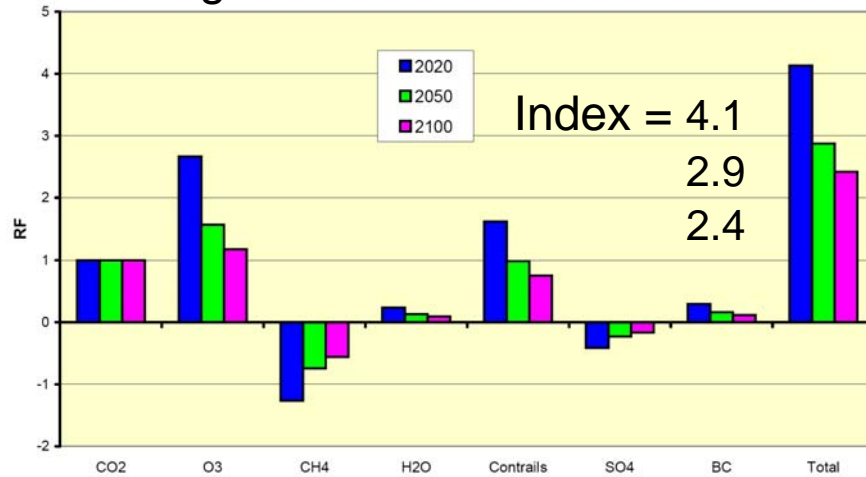


## Pulse\_2000: Normalised ( CO<sub>2</sub> ) temperature change



# Normalised (CO<sub>2</sub>) integrated RF and temperature change

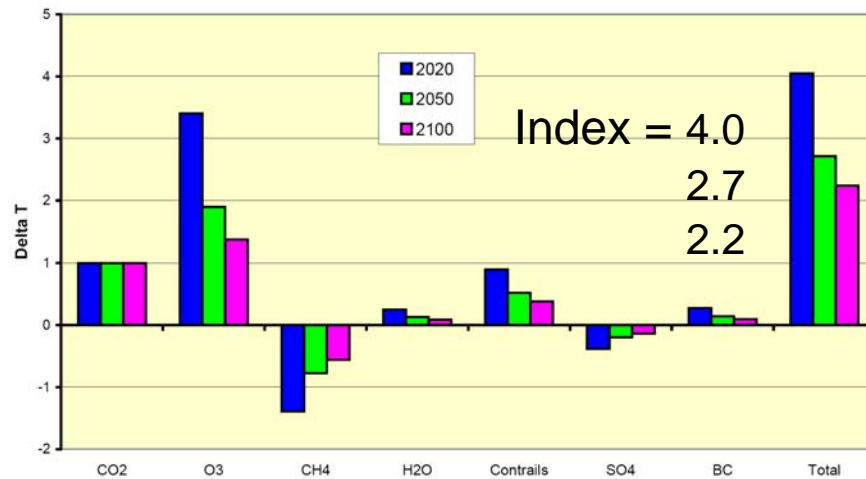
integrated RF Sustained\_2000



integrated RF Pulse\_2000



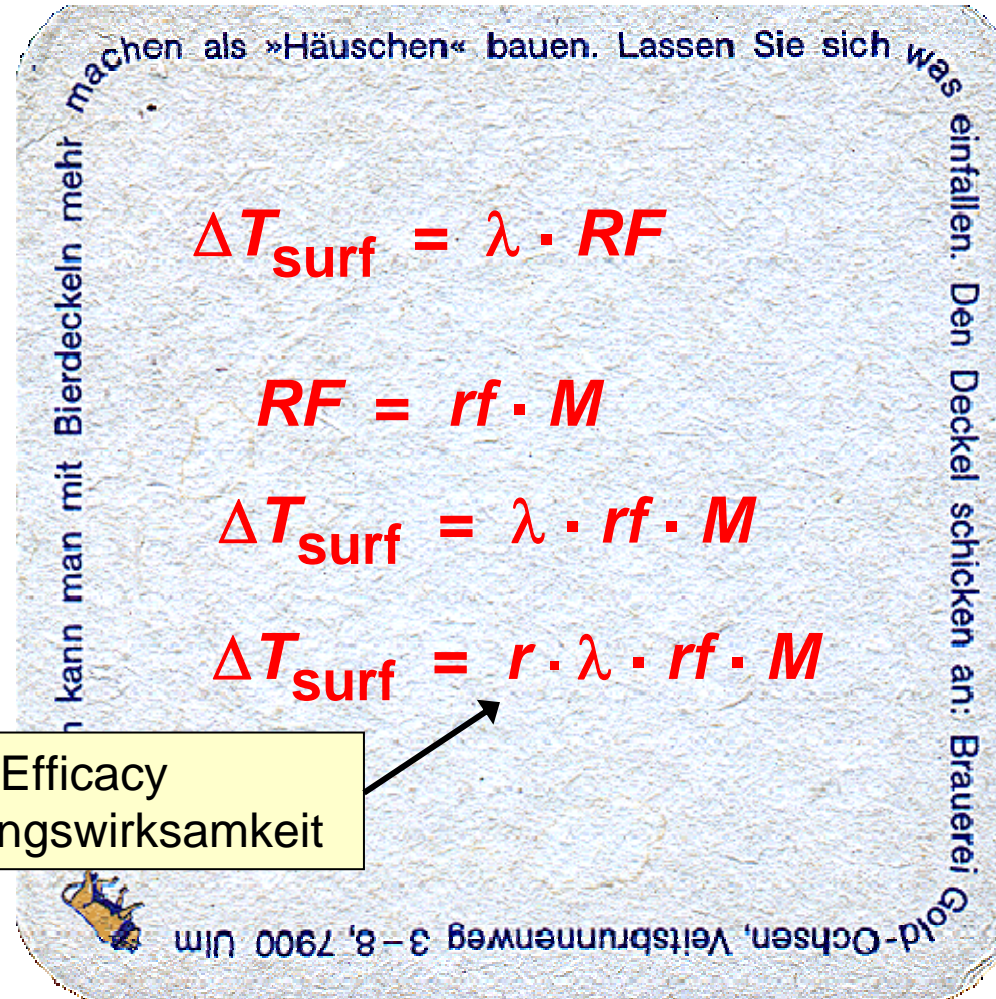
$\Delta T$  Sustained\_2000



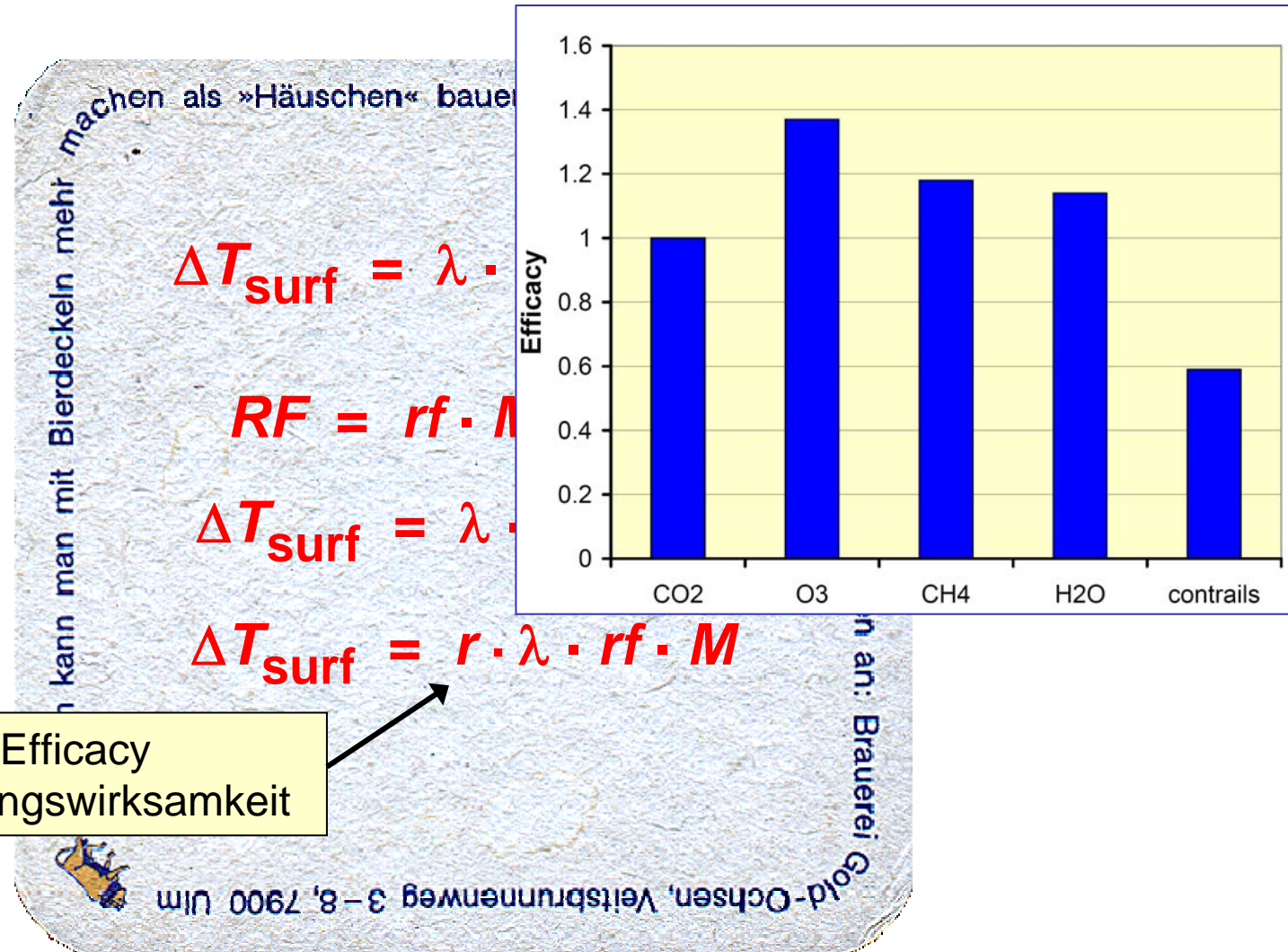
$\Delta T$  Pulse\_2000



# Radiative Forcing $RF$ and Surface Temperature Change $\Delta T_s$



# Radiative Forcing $RF$ and Surface Temperature Change $\Delta T_s$



Efficacy  
Strahlungswirksamkeit

# Schlussfolgerungen

- Neben dem Ausstoß von  $\text{CO}_2$  beeinflusst der Luftverkehr das Klima noch auf mehreren anderen Wegen ( $\text{O}_3$ ,  $\text{CH}_4$ , Partikel, Kondensstreifen, andere Wolken).
- Strahlungsantrieb  $RF$  und Radiative Forcing Index  $RFI$  sind keine geeigneten Maßzahlen zur Bewertung des zukünftigen Luftverkehrs
- Mögliche Maßzahlen sind die zeitliche Entwicklung des marginalen Strahlungsantriebs  $\Delta RF(t)$ , dessen zeitliches Integral und die verursachte Temperaturänderung  $\Delta T(t)$ .
- Bei einem Zeithorizont von 100 Jahren beträgt Verhältnis der Luftverkehrs bedingten Temperaturänderung aufgrund aller Effekte zur Temperaturänderung durch die  $\text{CO}_2$ -Emission 1.2, wenn man pulsförmige Emissionen eines Jahres betrachtet.
- Die Verwendung eines festen Faktors, mit dem die  $\text{CO}_2$ -Emissionen gewichtet werden, ist nicht optimal, da Innovationen verhindert werden. Besser wäre es, für jedes Flugzeug und jede Route die Summe der Beiträge zur Temperaturänderung zu nutzen (ermöglicht Triebwerke mit niedrigem  $\text{NO}_x$ -Ausstoß, umweltoptimierte Flugroutenplanung etc.).



# Einschränkungen

- Die Aussagen beruhen auf einem vereinfachten Modell, Unsicherheiten wurden nicht bestimmt. Die Indexzahl 1.2 darf nur als grobe Abschätzung gesehen werden und ist noch nicht für den praktischen Einsatz geeignet.
- Die Ergebnisse verschieben sich bei Berücksichtigung der Klimawirksamkeit (Efficacy) der einzelnen Beiträge.
- Es wurde nicht berücksichtigt, dass Methan eine Lebensdauer von deutlich mehr als einem Jahr ( $\sim 10a$ ) hat, ebenfalls außer Acht gelassen wurden langfristige Ozonänderungen.
- Der Beitrag durch "Contrail-Cirrus" und weitere Wolkeneffekte sind nicht berücksichtigt.
- Die Klimaantriebe des Luftverkehrs sind geographisch inhomogen verteilt. Dadurch werden regionale Klimaänderungen stärker vom Mittel abweichen, als das bei einem Anstieg der  $CO_2$ -Konzentration der Fall ist.